Neue Untersuchung des Einflusses von Röntgenstrahlen auf die Kondensation des Wasserdampfes und ein Versuch, die Dampfstrahlmethode quantitativ auszugestalten.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der hohen Philosophischen Fakultät der Königlichen Universität Marburg

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

vorgelegt von

Carl Leibfried
aus Jagstfeld a. N. (Württ.)

Mit 3 Figurentafeln am Schluß.

Marburg a. L. 1914
Buchdruckerei Robert Noske, Borna-Leipzig.

Von der philosophischen Fakultät der Universität Marburg angenommen am 26. Januar 1914.

Berichterstatter: Professor Dr. F. Richarz.

Meinen Eltern!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556030_0029

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Allgemeiner Teil.

Historisches über Kondensationskerne 1
a) Staubhypothese: Grundlegende Versuche von Coulier und J. Aitken 1
b) Ionen als Kondensationskerne 3
1. Untersuchungen von R. v. Helmholtz und F. Richarz 3
2. Untersuchungen von C. T. R. Wilson 4
c) Einfluß chemischer Prozesse auf die Kondensation 6
d) Veranlassung zu der vorliegenden Arbeit 7

II. Spezieller Teil.

A. Einfluß der Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Luft 10
1. Versuchsanordnung 10
a) Das Kondensationsgefäß 10
b) Die Vakuumeinrichtung 11
c) Anordnung der Röntgenröhre 13
d) Reinigung der Luft im Kondensationsgefäß 14
2. Ergebnisse der Untersuchung 15
B. Einfluß der Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Wasserstoff 18
1. Darstellung und Reinigung von Wasserstoff 19
2. Versuche 23
C. Erörterung der Versuchsergebnisse 23
D. Ein Versuch, die Dampfstrahlmethode quantitativ auszugestalten . 29
1. Anordnung der einzelnen Apparaturen 30
2. Versuchsergebnisse 38

I. Allgemeiner Teil.

Historisches über Kondensationskerne.

a) Staubhypothese: Grundlegende Versuche von Coulier und Aitken.

Die Untersuchungen über die Kondensationserscheinungen des Wasserdampfes in Gegenwart von Gasen oder anderen Dämpfen haben erst vom zweitletzten Viertel des vorigen Jahrhunderts an wesentliche Fortschritte aufzuweisen. Ein wichtiges Ergebnis in der von dieser Zeit an nun rasch fortschreitenden Entwicklung dieser Untersuchungen bildet die Entdeckung der Fähigkeit äußerst feinen „Staubes", in feuchter Luft bei Temperaturerniedrigung als Ansatzkerne für den Wasserdampf zu dienen, wie zuerst Coulier[1]) im Jahre 1875 gefunden hatte, und wie sie dann einige Jahre nachher unabhängig von ihm auch durch Aitken[2]) beobachtet wurde.

Coulier benutzte bei seinen Versuchen einmal gewöhnliche Luft, dann solche, die er durch ein Baumwollfilter geschickt hatte, oder die mehrere Tage lang im Untersuchungsgefäß gestanden hatte. Die zur Erzeugung einer Übersättigung erforderliche Temperaturerniedrigung erhielt er durch adiabatische Entspannung. Er komprimierte die in einem etwas Wasser enthaltenden Glasgefäß befindliche mit Wasserdampf gesättigte Luft mittels eines Gummiballes und ließ sie sich dann wieder plötzlich ausdehnen. In der mit gewöhnlicher Luft gefüllten

---

[1]) Coulier, Journal de Pharmacie et de Chimie sér. IV 22 (1875) S. 165 bis 173 u. 254/55; Nature 23 (1880/81) S. 337; Naturforscher 8. Jahrg. (1875) S. 400; Archiv der Pharmacie Bd. 209 der ganzen Folge oder III. Reihe Bd. 9 (1876) S. 72.

[2]) J. Aitken, Philos. Transactions of the Roy. Soc. of Edinburgh vol. 30 Part. 1—4 (1880—1883) S. 337; Nature vol. 23 (Nov. 1880 bis April 1881) S. 195.

Flasche beobachtete er nach der Entspannung, wenn er im verdunkelten Raum hinter dem Beobachtungsgefäß eine Lichtquelle anbrachte, eine starke Tropfenbildung, während diese ausblieb in dem Gefäß mit filtrierter oder abgestandener Luft. Aus diesen Versuchen zog er den Schluß, daß zum Entstehen von Nebel der „Staub" der Luft unbedingt erforderlich sei, wobei er dann unter dem Staub alle die fremden in der Atmosphäre in Unmengen schwebenden kleinen Teilchen versteht, die im Filter zurückgehalten werden können, oder die in der sich selbst überlassenen ruhigen Luft sich langsam zu Boden setzten.

Zu denselben Ergebnissen gelangte auch Aitken[1]) auf Grund seiner Untersuchungen. Er ließ heißen Wasserdampf aus einem Dampfkessel in zwei große Glasbehälter einströmen. Einer von ihnen war mit gewöhnlicher Luft gefüllt; der andere enthielt filtrierte Luft. Im ersteren beobachtete er beim Einströmen des Dampfes eine kräftige wolkenartige Kondensation, während diese beim anderen vollkommen ausblieb. Bei seinen weiteren Untersuchungen benutzte er das Verfahren von Coulier, jedoch nahm er die Entspannung mittels einer Wasserstrahlpumpe vor.

Diese Methode, bei der die Abkühlung des Gases durch plötzliche Druckverminderung hervorgebracht wird, nennt man kurz die „Entspannungsmethode". Sie wurde später noch von J. Kießling,[2]) R. v. Helmholtz,[3]) Lenard u. Wolff,[4]) C. T. R. Wilson,[5]) E. Barkow,[6]) E. Pringal,[7]) W. Bieber[8]) und anderen zu ihren

---

[1]) loc. cit.

[2]) J. Kießling, Untersuchungen über Dämmerungserscheinungen zur Erklärung der nach dem Krakatauausbruch beobachteten atmosphärisch-optischen Störungen, Hamburg und Leipzig (bei Voß) 1888.

[3]) R. v. Helmholtz, Inaug.-Diss., Wied. Ann. 27 (1886) S. 508—543.

[4]) Lenard u. Wolff, Wied. Ann. 37 (1889) S. 443—456.

[5]) C. T. R. Wilson, Philos. Transactions of the Roy. Soc. of London ser. A. vol. 189 (1897) S. 265—307.

[6]) E. Barkow, Inaug.-Diss. Marburg 1906, Ann. d. Phys. IV. 23 (1907) S. 317—344.

[7]) E. Pringal, Inaug.-Diss. Marburg 1908, Ann. d. Phys. IV. 26 (1908) S. 727—750.

[8]) W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911, Ann. d. Phys. IV. 39 (1912) S. 1313—1337.

Versuchen angewandt und hat eine außerordentliche Vervollkommnung erfahren.

Durch die gefundene Tatsache, daß zum Entstehen von Nebel außer einer Erniedrigung der Temperatur auch noch das Vorhandensein von „Kernen“ notwendig ist und als solche, wie wir bisher gesehen haben, der Staub der Luft dient, waren in der Folgezeit einige Forscher zu der irrigen Meinung gelangt, nun auch jede erscheinende Kondensation allein und nur allein dem Staub zuzuschreiben; umgekehrt, in jeder Nebelbildung sahen sie direkt den Beweis für die Anwesenheit von Staub.[1])

b) Ionen als Kondensationskerne.

1. Untersuchungen von R. v. Helmholtz und F. Richarz.

Andererseits hat aber R. v. Helmholtz[2]) bereits in seinen „Versuchen mit einem Dampfstrahl“, einer neuen bequemeren Methode zur Untersuchung von Kondensationserscheinungen, festgestellt, daß die von ihm gefundene Wirkung auf die vermehrte Kondensation im Dampfstrahl der aus einer feinen Metallspitze ausströmenden Elektrizität nicht dem Einfluß des Staubes zuzuschreiben sei, sondern daß hier nach seiner Ansicht als Kondensationskerne die erzeugten „Ionen“ in Betracht kommen. In späteren Untersuchungen haben dann R. v. Helmholtz und F. Richarz (s. u.) obige Versuche auch auf staubfreie Luft, reine Gase und auf Dampfstrahle anderer Substanzen als das Wasser ausgedehnt. Außer der schon bekannten Wirkung der Spitzenausströmung fanden sie auch eine Wirkung des elektrischen Wechselfeldes. In beiden Fällen dieser Elektrizitätseinwirkungen konnten sie durch ihre Versuche in staubfreien Gasen den Beweis für die Richtigkeit der Ansicht von R. v. Helmholtz erbringen. Der zuerst von F. Richarz[3]) gefundene Einfluß der

---

[1]) s. Lenard u. Wolff, loc. cit.; Lenard, Ann. d. Phys. IV. 1 (1900) S. 486 in der Recapitulation. Dagegen R. v. Helmholtz und F. Richarz, Wied. Ann. 40 (1890) S. 161—202; insbesondere betr. ultraviolettes Licht S. 186—188.

[2]) R. v. Helmholtz, Wied. Ann. 32 (1887) S. 1—19.

[3]) F. Richarz, Wied. Ann. 59 (1896) S. 592—594.

Röntgenstrahlen auf die Kondensation des Wasserdampfes bildete einen weiteren Beweis für die Wirkung der Ionen als Kondensationskerne.

2. Untersuchungen von C. T. R. Wilson.

Die Versuche C. T. R. Wilsons[1]) bestätigten vollkommen die Fähigkeit der Ionen, kondensationsfördernd zu wirken. Er konnte direkt Ionen als Träger von Nebeltröpfchen nachweisen. Seine Untersuchungen entschieden somit vollauf zugunsten der von R. v. Helmholtz und F. Richarz. Zu seinen Untersuchungen benutzte er die Entspannungsmethode. Er hat sie als erster zu quantitativen Messungen ausgebildet. Als Maß für die Entspannung führt er, wie es sich aus seiner Versuchsanordnung ergibt, das Verhältnis $\frac{V_2}{V_1}$ ein, d. h. das Verhältnis des Gasvolumens nach Beendigung der Entspannung zu dem kleineren vor der Entspannung. Er zeigt dann, daß in staubfreien Gasen wie Luft, Sauerstoff und Stickstoff keine Tropfenbildung eintritt, solange die Entspannungen noch unterhalb des Wertes $\frac{V_2}{V_1} = 1{,}25$ liegen. Bei der Entspannung $\frac{V_2}{V_1} = 1{,}25$ erscheinen in geringer Anzahl die allerersten Tropfen, die beim Überschreiten dieses Wertes der Entspannung sich um verhältnismäßig wenige vermehren. Diese „regenartige“ Kondensation, wie C. T. R. Wilson sie nennt, bleibt bestehen bis zu einem größeren Entspannungsverhältnis $\frac{V_2}{V_1} = 1{,}38$, von wo an eine neue Art der Kondensation, die „wolkenartige“, eintritt, und eine starke Vermehrung der Tropfenanzahl Platz greift. Es tritt demnach in einem normalen Gase, ohne daß die Anwesenheit von Staub erforderlich ist, eine kräftige Nebelbildung ein, wenn das Expansionsverhältnis den bestimmten Grenzwert $\frac{V_2}{V_1} = 1{,}38$ überschreitet, der außer

---

[1]) C. T. R. Wilson, Philos. Transactions of the Roy. Soc. of London ser. A. vol. 189 (1897) S. 265—307, ser. A. vol. 192 (1899) S. 403—453.

in den schon genannten Gasen auch in Wasserstoff konstatiert werden konnte und einer etwa achtfachen Übersättigung entspricht. Der bei dieser Übersättigung ausfallende Nebel besteht aus ungeladenen Tropfen und wird der „normale“ Nebel genannt.

Beim Bestrahlen eines solchen Gases mit Röntgenstrahlen zeigt sich nach den Versuchen C. T. R. Wilsons genau so wie beim unbestrahlten keine Kondensation, bis die Entspannung den Wert $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}25$ erreicht hat. Anstatt der wenigen Tropfen, die unter gewöhnlichen Umständen zwischen dieser Größe und der Grenze der normalen Kondensation erscheinen, entsteht jetzt eine kräftige Nebelbildung, sofern die Bestrahlung intensiv genug war.

Zum Nachweis der durch die Röntgenstrahlen gebildeten Ionen als Ansatzkerne für den Wasserdampf setzt Wilson[1]) ein Gas zwischen den Polplatten eines starken elektrischen Feldes der Einwirkung der Strahlen aus. Solange das elektrische Feld während der Bestrahlung in Tätigkeit ist, erhält er bei Entspannungen über dem Expansionswert $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}25$ eine nur geringe Kondensation. Sobald aber das elektrische Feld ausgeschaltet ist, erfolgt bei denselben Entspannungen unter dem Einfluß der Röntgenstrahlen eine starke Nebelbildung. Durch eine geeignete Änderung der eben angewandten Versuchsanordnung läßt sich auch zeigen, daß die positiven und negativen Ionen bezüglich ihrer kondensierenden Wirkung sich verschieden verhalten. Und zwar findet man, daß die Kerne, deren Kondensationsprodukte bei der Grenze $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}25$, bei etwa vierfacher Übersättigung ausfallen, die negativen Ionen sind, während die positiven erst bei einer höheren Grenze $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}31$, bei etwa sechsfacher Übersättigung, folgen. Hat der Entspannungswert die Größe von 1,28 erreicht, dann sind alle negativen Ionen zur Nebelbildung heran-

---

[1]) C. T. R. Wilson, Philos. Transactions of the Roy. Soc. of London ser. A. vol. 192 (1899) S. 445, ser. A. vol. 193 (1900) S. 289—308.

gezogen worden, während sämtliche positiven erst bei $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}35$ erfaßt worden sind.

Daß positive und negative Elektrizität verschieden auf die Kondensation einwirkt, hat schon vorher J. J. Thomson[1]) durch einen Versuch mit dem Dampfstrahl festgestellt. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, daß nach den Untersuchungen von K. Przibram[2]) bei Alkoholdämpfen die Reihenfolge, in der die Ionen als Kondensationskerne dienen, gerade umgekehrt ist.

c) Einfluß chemischer Prozesse auf die Kondensation.

Wie aus den seitherigen Erörterungen hervorgeht, kann der Wasserdampf an Staub und Ionen nur dann sich niederschlagen, wenn auf irgendeine Weise der für diese Kerne notwendige Übersättigungsgrad erreicht ist. Eine solche Kondensation, die nur erfolgt bei Erzeugung einer wenn auch nur geringen Übersättigung, nennen wir eine „erzwungene Kondensation". Weitgehender können nun zum Teil chemische Prozesse die Kondensation des Wasserdampfes begünstigen. Ihre Wirkung auf die Kondensation von Wasserdampf und anderen Dämpfen wurde zuerst von R. v. Helmholtz und F. Richarz[3]) mit der Dampfstrahlmethode einwandfrei nachgewiesen. Sei es, daß in den mit Wasserdampf gemischten Gasen ein chemischer Prozeß stattfindet, ohne daß der Wasserdampf daran beteiligt ist, sei es, daß eine Substanz mit ihm in chemische Reaktion tritt oder aber nur hygroskopische Eigenschaften zeigt, immer werden wir in diesen Fällen einen begünstigenden Einfluß auf die Kondensation des Dampfes finden, einen Einfluß, der zum Teil so stark sein kann, daß bereits in nicht ganz mit Wasserdampf gesättigten Gasen, oder solchen, bei denen die Sättigung eben vorhanden ist, Kondensation, die sogen. „freiwillige Kondensation", eintritt. Es

[1]) J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen (Deutsch von E. Marx), Leipzig 1906 S. 145.

[2]) K. Przibram, Sitz.-Ber. d. K. Akad. d. Wissensch. Wien, math.-naturw. Kl. 1906 S. 33—38; Physik. Zeitschr. 8 (1907) S. 561—564.

[3]) R. v. Helmholtz und F. Richarz, Wied. Ann. 40 (1890) S. 161—202.

wird daher jede freiwillige Kondensation auf diese Ursachen zurückzuführen sein. Sollte jedoch trotz des Vorhandenseins solcher Ursachen eine freiwillige Kondensation nicht zustande kommen, dann läßt sich durch Hervorrufen einer Übersättigung, die in vielen Fällen nur gering zu sein braucht, die Nebelbildung auslösen. Wenn also in einem Gase eine Nebelbildung unterhalb der vierfachen Übersättigung erfolgt, dann kann der Grund für das Eintreten der Kondensation entweder auf der gleichzeitigen Anwesenheit von Staub und solchen chemischen Prozessen beruhen oder aber nur auf der Anwesenheit von je einer der beiden die Kondensation fördernden Ursachen. Es läßt sich daher bei dem Auftreten einer Kondensation unterhalb der vierfachen Übersättigung erst auf die Anwesenheit solcher Substanzen, die eben chemische Reaktionen untereinander oder aber auch mit dem Wasserdampf einzugehen vermögen, schließen, wenn durch die Versuchsanordnung die Gewähr geboten ist, daß sicherlich aller Staub ausgeschlossen ist. Man wird zur Erklärung der freiwilligen Kondensation anzunehmen haben, daß die Produkte der chemischen Prozesse eine, wenn auch event. nur geringe hygroskopische Wirkung auf den Wasserdampf ausüben.

d) Veranlassung zu der vorliegenden Arbeit.

Durch starkes Elektrisieren mit dem Wechselfeld läßt sich nun in gewissen Fällen und unter bestimmten Bedingungen freiwillige Kondensation erhalten, wie die Versuche von E. Barkow[1]) und E. Pringal[2]) über diesen Punkt zeigen. Die freiwillige Kondensation unterbleibt aber, wenn man die Anordnung des Versuchsapparates nach der von E. Pringal angegebenen Weise dahin ändert, daß von den Polplatten keine elektrischen Funken mehr abspringen. Erzwungene Kondensation unterhalb der „Ionengrenze“ (der Ionengrenze entspricht $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}25$ oder eine

[1]) E. Barkow, Inaug.-Diss. Marburg 1906 S. 19—23, Ann. d. Phys. IV. 23 (1907) S. 321—324.

[2]) E. Pringal, Inaug.-Diss. Marburg 1908 S. 41—54, Ann. d. Phys. IV. 26 (1908) S. 740—747.

Druckverminderung um 15 cm Quecksilber) tritt dagegen immer noch auf, wenigstens in Luft, Sauerstoff und Stickstoff auch bei nur kurzer Wirkung des Wechselfeldes.

Anders verhält sich aber der Wasserstoff. Bei momentaner Elektrisierung und gleichzeitigem Entspannen konnte Pringal auch über der Ionengrenze keine Nebelbildung wahrnehmen. Erst nach mehrmaligem Wiederholen des Versuchs konnte er eine geringe Tropfenbildung bei etwa 15—17 cm Druckerniedrigung beobachten. Auch scheint eine längere Wirkung des Wechselfeldes nicht immer von bedeutenderem Einfluß auf die Kondensation gewesen zu sein, und nicht immer erfolgte eine Tropfenbildung nach dem Elektrisieren. Sobald jedoch einmal in einem Versuche Kondensation eingetreten war, konnte sie in den nächsten gleich darauf angestellten Versuchen auch unterhalb der Ionengrenze beobachtet werden.

Demnach hätte das Wechselfeld auf die Ionisation des Wasserstoffs und auf eine Kernbildung in demselben auch unterhalb der Ionengrenze eine äußerst schwache Einwirkung. Demgegenüber konnten R. v. Helmholtz und F. Richarz,[1]) die in ihren Dampfstrahlversuchen prinzipiell dieselbe Anordnung des Wechselfeldes hatten, feststellen, daß gerade in Wasserstoff die Wirkung des Wechselfeldes auf den Dampfstrahl bei weitem stärker war als in anderen Gasen.

Diesen Widerspruch aufzuklären, war zunächst meine Aufgabe. Dazu war es notwendig, die Dampfstrahlmethode dergestalt zu erweitern, daß man bei ihr genau wie bei der Entspannungsmethode den Grad der Übersättigung angeben kann, bei dem irgendeine Kondensation erfolgt, ob also z. B. eine auftretende Nebelbildung oberhalb oder unterhalb der Ionengrenze sich einstellt oder erst über der Grenze der normalen Kondensation. Es handelte sich demnach zunächst im wesentlichen um die Feststellung der Ionen- und der normalen Grenze der Kondensation im Dampfstrahl. Schon hier will ich vorausschicken, daß mir eine befriedigende Lösung dieser letzten Frage nicht gelungen ist, wohl aber von mir der Weg angegeben werden konnte, eine solche zu ermöglichen.

[1]) R. v. Helmholtz u. F. Richarz, Wied. Ann. 40 (1890) S. 178.

Die Röntgenstrahlen waren nach den bisherigen Untersuchungen das einzige Mittel zur Erzeugung einer starken Ionisation, ohne daß in dem bestrahlten Gase Kerne erzeugt wurden, die auch unterhalb der Ionengrenze Veranlassung zu einer Nebelbildung geben würden.

Bei der Anwendung der Röntgenstrahlen konnte ich jedoch ein merkwürdiges Verhalten des Kondensationsanfangs beobachten in dem zugleich für die Dampfstrahl- und Entspannungsmethode benutzten Gefäße, so daß es wohl der Mühe wert schien, genauere Untersuchungen darüber anzustellen, von welchen Faktoren dieses Verhalten abhängig war. Diese Versuche wurden nur mit der Entspannungsmethode ausgeführt mit der im hiesigen Institut ausgebildeten Apparatur, die im folgenden beschrieben werden wird. Auf meine Versuche über die Dampfstrahlmethode komme ich in Teil D meiner Arbeit auf S. 29 zurück.

II. Spezieller Teil.

A. Einfluß der Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Luft.

1. Versuchsanordnung.

a) Das Kondensationsgefäß.

(Fig. auf Tafel I.)

Ein Rundkolben mit kurzem Hals aus Jenaer Glas und einem Inhalt von 2 Liter bildete das Nebelgefäß N, in dem die Kondensation beobachtet wurde. Dieses wurde mit dem Hals nach abwärts in einen dafür angefertigten Glasschliff gesenkt, durch den drei Glasröhren bis in die Mitte des Kolbens führten. Durch die eine der drei Röhren R_1 konnte das zu untersuchende Gas in das Gefäß geleitet werden, die zweite R_2 stand mit dem Manometer M, an dem die Größe der Entspannung abgelesen wurde, in Verbindung, während die dritte R_3 endlich zum Vakuum führte, vermittels dessen die Entspannung vorgenommen wurde. Ein vierter Ansatz R_4 an dem Schliff diente zum Einfüllen von Wasser in das Gefäß. Sämtliche vier Röhren waren, kurz bevor sie in das Nebelgefäß einmündeten, mit Hähnen versehen, wodurch das Gefäß vollkommen für sich von der übrigen Leitung abgeschlossen werden konnte. Damit jener Schliff zuverlässig dicht hielt, war eine Quecksilberdichtung Q an ihm angebracht. Zu den Versuchen wurde das Beobachtungsgefäß bis zu etwa $^1/_4$ seines Inhalts mit ausgekochtem destilliertem Wasser gefüllt.

Zur schnellen Reinigung von Kondensationskernen des mit dem Nebelgefäß verbundenen Manometerzweigs bezw. zur

rascheren Verdrängung eines Gases durch ein anderes zu untersuchendes Gas, war etwas über der Stelle, an der die Quecksilberkuppe des linken Manometerschenkels sich befand, wenn in diesem das Quecksilber seinen höchsten Stand erreichte, ein Ansatz A mit einem Hahn angebracht, durch den bei diesem Manometerstand so lange Gas durchgeleitet wurde, bis man annehmen konnte, daß es im Manometerzweig kernfrei bezw. das andere Gas vollkommen verdrängt war. Durch diese Vorrichtung konnte man in viel kürzerer Zeit dasselbe erreichen, wozu man erst durch oft wiederholtes Entspannen gekommen wäre. Auf beiden Quecksilberkuppen des Manometers befanden sich noch einige Zentimeter Wasser aufgeschichtet. Dieselbe Anordnung hat bereits W. Bieber[1]) zu seinen Untersuchungen benutzt.

b) Vakuumeinrichtung.

Die zur Entspannung des Nebelgefäßes erforderliche Vakuumeinrichtung ist, wie ich sie anwandte, bereits von E. Barkow[2]) angegeben worden und besteht im wesentlichen aus 2 Teilen, dem Hauptvakuum und dem Vorvakuum. Das Hauptvakuum bildeten 5 große Glasballons von je etwa 30 cm Durchmesser, die untereinander verbunden waren und die mit einer Wasserstrahlpumpe auf einen Unterdruck ausgepumpt werden konnten, der sich an einem Quecksilbermanometer ablesen ließ. Durch eine Rohrleitung stand dieses Hauptvakuum mit dem Vorvakuum, einem weiteren Ballon von 40 cm Durchmesser, ebenfalls mit Quecksilbermanometer versehen, in Verbindung. Von hier aus führte dann weiter eine Leitung zunächst aus Bleirohr und dann aus Glasrohr, die beide durch Siegellack ineinander gekittet waren, zu der Röhre R_3 des Nebelgefäßes.

Um nun eine gewünschte Entspannung im Nebelgefäß zu erhalten, stellt man das Manometer des Vorvakuums auf einen

---

[1]) W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911 S. 13, Ann. d. Phys. IV. 39 (1912) S. 1318.

[2]) E. Barkow, Inaug.-Diss. Marburg 1906, Ann. d. Phys. IV. 23 (1907) S. 318.

vorher empirisch gefundenen Unterdruck ein und führt dann die Verbindung des Vorvakuums durch Öffnen eines möglichst weit gebohrten Hahnes mit der Röhre R_3 herbei. Dadurch steigt der Druck im Vorvakuum durch das Hinzukommen eines verhältnismäßig kleinen Volumens von Gas zu dem des Ballons nur sehr wenig, was leicht wieder durch Auspumpen durch das Hauptvakuum ausgeglichen werden kann. Man war also durch diese Einrichtung imstande, mehrere Versuche hintereinander auszuführen, ohne immer von neuem die Wasserstrahlpumpe in Gang setzen zu müssen.

Im Laufe der Untersuchungen stellte es sich nun als zweckmäßig heraus, neben dem schon vorhandenen noch ein zweites Vorvakuum einzuführen, so daß abwechselnd durch das eine oder das andere entspannt werden konnte. Mit dem einen allein war es nicht gut möglich, ohne unnötigen Zeitverlust z. B. von einer unteren Entspannungsgröße von 1 cm Quecksilber rasch zu einer solchen einige Zentimeter höher gelegenen von etwa 10 cm zu gelangen, da das Auspumpen des Vorvakuums durch das Hauptvakuum immerhin ziemlich langsam vor sich ging. In der Zeit, in der man dann mit Hilfe des einen Vorvakuums einen Versuch ausführte, konnte das andere bereits auf die Marke eingestellt werden, die für die nächstgewünschte Entspannung in Betracht kommt. Dadurch war ein sehr rasches Arbeiten gewährleistet, das von Vorteil war, da in den angestellten Versuchen der Eintritt der Kondensation an einer im voraus unbekannten Grenze beobachtet werden sollte, die, um überhaupt ungefähr ihre Lage festzustellen, selbst wieder zunächst zwischen zwei Grenzwerte eingeschlossen werden mußte, ehe man an ihre genaue Bestimmung gehen konnte. Besonders rasch mußte das Eingrenzen geschehen bei dem Vorhandensein weniger event. rasch verschwindender Kerne.

Als Beleuchtungsquelle zur Beobachtung dieser entstandenen Nebelbildung diente eine in einen Blechkasten eingehüllte Bogenlampe, deren Licht mittels eines Kondensors in das Kondensationsgefäß geworfen wurde. Bei diesem scharf begrenzten Lichtkegel war es möglich, jede feinste Nebelbildung und geringste vereinzelte Tropfenbildung wahrzunehmen.

c) Anordnung der Röntgenröhre.

Zur Untersuchung der Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Kondensation des Wasserdampfes in Luft oder Wasserstoff benutzte ich eine für Dauerbetrieb geeignete, regenerierbare Intensivstrom-Röntgenröhre größter Konstruktion mit luftgekühlter Antikathode von der Firma Gundelach, Gehlberg in Thüringen. Zur Abblendung der nicht gewünschten Strahlen stand sie in einem oben offenen mit Bleiblech ausgeschlagenen Holzkasten von 80 cm Länge, 40 cm Breite und 60 cm Höhe. Der Kasten befand sich so nahe wie möglich direkt hinter dem zur Bestrahlung kommenden Versuchsgefäß. Für den Austritt der Strahlung war in der Vorderseite 80 × 60 cm des Kastens eine Öffnung von 20 × 10 cm in Höhe des Nebelgefäßes eingeschnitten, die selbst wieder durch ein vorgeschobenes Bleiblech verschlossen werden konnte, um die Wirkung der Strahlung auszuschalten, wenn irgendwelche Vorkehrungen für den sicheren Betrieb der Röhre und deren gutes Funktionieren getroffen werden mußten. Ferner war die Röhre so gestellt, daß das Intensitätsmaximum der Strahlung das Nebelgefäß traf. Ihre Entfernung von dem Beobachtungsgefäß betrug etwa 10 cm. Um Intensitätsschwankungen in der Belastung der Röhre vorzubeugen, war der Röhre parallel eine Funkenstrecke geschaltet, die auf ein Minimum ihrer Länge reduziert wurde. Getrieben wurde die Röhre durch ein Induktorium für ca. 35 cm Schlagweite mit Wehneltunterbrecher. Die primäre Stromstärke betrug durchschnittlich 11—12 Amp.

Die Zuführung der Entladungen zu der Röhre geschah an den Schmalseiten des Kastens vermittels umsponnener, durch Gummi isolierter Drähte, die mittels Paraffin nacheinander in 1 cm weite Glasröhren und sodann in 2,5 cm weite Porzellanröhren von je 30 cm Länge eingegossen waren. Zur Vermeidung event. Induktionswirkungen des hochgespannten Stromes auf das Nebelgefäß war der Kasten dauernd geerdet.

Ohne künstliche Luftkühlung (Ventilator im Kasten) konnte die Röhre 7 Minuten lang in Betrieb gehalten werden. In dieser Zeit hatte sie sich dann allerdings schon so stark erwärmt, daß

sie, um eine Schädigung der Röhre zu vermeiden, auf längere Zeit außer Betrieb gesetzt werden mußte. Jedoch genügte diese Zeit der Bestrahlung für meine Versuche.

d) Reinigung der Luft im Kondensationsgefäß.

Die aus dem Freien entnommene zur Untersuchung kommende Luft mußte zuerst einer Reinigung unterzogen werden. Zunächst passierte sie ein 140 cm langes und 3 cm weites Rohr, gefüllt mit lose aufeinandergeschichtetem Chlorkalzium. Dann durchstrich sie ferner ein 120 cm langes fest mit Glaswolle gestopftes Rohr von derselben Weite wie das erste. Von hier gelangte sie zur Sättigung mit Wasserdampf durch ein mit destilliertem Wasser gefülltes 115 cm langes Pettenkofersches Rohr, ging dann nochmals durch ein 30 cm langes stark gestopftes Glaswollefilter und erreichte so gereinigt das Nebelgefäß. Die mit Chlorkalzium gefüllte Röhre war aus dem Grunde angewandt worden, damit an den Chlorkalziumstückchen, die zusammen der eintretenden feuchten Luft eine äußerst große Oberfläche boten, schon ein großer Teil von Kondensationskernen abgefangen wurde. Vor allem sollten auch lokale Verunreinigungen (fester Art), die infolge des langen Gebrauchs der Luftleitung eine zu rasche Verunreinigung des sorgfältig mit Glaswolle gestopften Filters bedingt und damit ein baldiges Auswechseln und Neuherstellen desselben erfordert hätten, beseitigt werden. Solch neue Filter haben nach Erfahrung besonders bei großer Länge selbst wieder den Nachteil, daß sie nach einiger Zeit immer noch Kerne abgeben. Durch das Glaswollefilter wurden Staub und hygroskopische Substanzen zurückgehalten, welch letztere, wenn sie noch das Filter passierten, im zweiten Filter zurückblieben, nachdem ihnen beim Durchgang durch das destillierte Wasser Gelegenheit gegeben war, Tröpfchen zu bilden, die nicht durch das Filter hindurchkommen konnten.

Damit die Sättigung mit Wasserdampf der durch die Pettenkofersche Röhre gegangenen Luft möglichst vollkommen war, war in die Röhre an der Seite, an der die Luft zuströmte, eine feine Glasspitze eingeschmolzen, damit das Gas nur in ganz

kleinen Blasen eintreten konnte. Außerdem erweiterte sich die Röhre an beiden Enden zu Kugeln, um bei etwa vorkommenden Druckdifferenzen ein Überfließen des Wassers zu verhindern.

Die einzelnen Glasröhren der ganzen Leitung waren untereinander durch Glasschliffe verbunden. Um einem Undichtwerden dieser Verbindungen vorzubeugen, durch etwaige Lockerung der Schliffe, wurden die etwas eingefetteten Schliffteile durch Spiralfedern aus Messingdraht ineinander gepreßt. Die Spiralfedern waren zwischen die an beiden Schliffteilen angeschmolzenen Haken gespannt. Ferner waren noch die Schlifftrichter mit schwarzem Wachskitt ausgegossen.

Die nunmehr vorzunehmende Reinigung des Nebelgefässes von Kondensationskernen wurde auf die Weise vorgenommen, daß man abwechselnd entspannte, den gebildeten Nebel sich setzen ließ und dann filtrierte Luft zuleitete. Dieses Verfahren wiederholte man so oft, bis man beim Entspannen unter 15 cm Quecksilber keine Tropfenbildung mehr wahrnehmen konnte. Der geringe Rest von Kondensationskernen im Manometerzweig wurde durch die auf S. 10—11 bereits erwähnte Vorrichtung beseitigt. Den eigentlichen Versuchen stand nun nichts mehr im Wege.

2. Ergebnisse der Untersuchung.

Bei meinen Versuchen über die Kondensation von Wasserdampf unter dem Einfluß von Röntgenstrahlen fand ich eine Kernbildung, die unter Umständen weit unterhalb der Ionengrenze bereits bei ganz geringen Übersättigungen Veranlassung zur Nebelbildung geben kann. Eine durch die Röntgenstrahlen hervorgerufene Kernbildung, die gleichfalls unterhalb der Ionengrenze eine Nebelbildung bei etwa zweifacher Übersättigung veranlaßte, wurde schon früher von E. Barkow[1]) und W. Bieber[2]) gefunden. Bei Barkow hatte sich in Luft bei dieser Übersättigung bereits ein sehr starker Nebel gebildet, während

[1]) E. Barkow, Inaug.-Diss. Marburg 1906 S. 23—25, Ann. d. Phys. IV. 23 (1907) S. 324/25.

[2]) W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911 S. 37.

Bieber in reinem Sauerstoff nur wenige Tropfen bekam. Auch schon zu Anfang meiner Versuche zeigte sich bei langer Bestrahlung des Expansionsgefäßes ein Nebel bei Entspannungen unterhalb der Ionengrenze, und zwar erfolgte der Eintritt der Kondensation anfänglich ganz unregelmäßig, das eine Mal bei größeren, das andere Mal bei kleineren Entspannungen. Die Veränderlichkeit dieser Erscheinung bei verschiedenen Versuchen legte die Vermutung nahe, daß die Größe der zur Erzeugung des Nebels erforderlichen Entspannung von der Natur (Härte) und vielleicht auch von der Dauer der Strahlung abhängig sei.

Um die Abhängigkeit von der Natur der Strahlen zu konstatieren, wurden zwischen Röntgenröhre und Nebelgefäß Schirme aus Zinkblech nacheinander von verschiedener Stärke eingeschaltet, um so die Härte der durchgelassenen Strahlen zu variieren.[1]) Zugleich konnte dann bei je einem solchen Zinkblech durch Anwendung verschiedener Strahlungszeiten der Einfluß der letzteren festgestellt werden. Aus demselben Grunde wie der mit Blei ausgeschlagene Kasten waren auch jetzt die Zinkbleche geerdet. Die Ergebnisse dieser Versuche bei 2 solchen Zinkblechen verschiedener Dicke sind in den folgenden drei Tabellen angegeben.

I.
Zinkblech von 0,46 mm Dicke.

Zeit der Bestrahlung	Entspannung in cm Quecksilber für die untere Kondensationsgrenze.
2 Min.	2 cm
3 Min.	1,1 cm
4 Min.	0,7 cm

II.
Zinkblech von 0,71 mm Dicke.

Zeit der Bestrahlung	Entspannung in cm Quecksilber für die untere Kondensationsgrenze.
2 Min.	um 8 cm
3 Min.	„ 4 cm
4 Min.	„ 3 cm

Die Tabellen zeigen, daß mit zunehmender Zeit die Kondensationsgrenze erniedrigt wird, und zwar bei dem dünneren Zinkblech stärker als bei dem dickeren und ohne ein solches nach

[1]) W. C. Röntgen, Wied. Ann. 64 (1898) S. 1—37.

einem nicht in der Tabelle angegebenen Versuch wieder stärker als bei dem dünneren.

Zugleich ergibt sich aus den beiden Tabellen, daß die weichen Strahlen Kerne erzeugen, die bei einer kleineren Übersättigung kondensieren, als die durch die härteren Strahlen gebildeten. Eine Fortsetzung der Versuche der Tabelle I mit wachsenden Bestrahlungszeiten:

III.

Zinkblech von 0,46 mm Dicke.

Zeit der Bestrahlung	Entspannung in cm Quecksilber für die untere Kondensationsgrenze.
2 Min.	2 cm
3 Min.	1,1 cm
4 Min.	0,7 cm
5 Min.	0,4 cm
6 Min.	0,4 cm
21 Min.	0,4 cm
42 Min.	0,4 cm

läßt erkennen, daß die Kondensationsgrenze mit zunehmender Bestrahlungsdauer einer unteren Grenze sich nähert, die bei der gegebenen Anordnung und Röntgenröhre selbst durch hohe Zeiten, z. B. 42 Min.,[1]) nicht mehr erniedrigt werden kann.

Was die Beobachtung des Kondensationseintritts anbetrifft, so konnte er am besten wahrgenommen werden in den Versuchen mit dem 0,46 mm starken Zinkblech, da hier die von den Röntgenstrahlen erzeugten Kerne äußerst zahlreich waren, und außerdem die zu suchende Grenze der ersten Tropfen ziemlich niedrig lag, so daß es nur weniger und kleiner Entspannungen bedurfte, um sie zu erhalten. Etwas beschwerlicher gestaltete sich die Beobachtung bei dem dickeren Zinkblech, da die Tropfenanzahl geringer war, und die Entspannungen größer sein mußten.

[1]) Diese lange Bestrahlungszeit war selbst bei der Intensivstrom-Röntgenröhre nur mit Pausen von ca. 20 Minuten zwischen den 6 Einzelbestrahlungen von 7 Minuten zu erreichen.

Bei den in den Tabellen angegebenen Entspannungswerten für die Nebelgrenze erschienen gerade immer die allerersten Tropfen von beträchtlicher Größe und hellglänzendem Aussehen. Bei höheren Entspannungswerten der gleichen Bestrahlungsdauer wuchs die Zahl der Tropfen sehr rasch an, und diese bildeten wenigstens in den Versuchen der Tabelle I, wenn man lange Bestrahlungszeiten gebraucht hatte, einen dichten langsam fallenden (Dauer der Fallzeit gegen 3 Minuten) beim Verdampfen der einzelnen Tropfen zum Teil irisierenden Nebel. In den Versuchen der Tabelle II war die Nebelbildung schwächer.

Selbstverständlich muß auch, da ja die Nebelgrenze mit der Verlängerung der Strahlungszeit herabsinkt, für längere Bestrahlungszeiten und Entspannungen, wie sie notwendig sind, um bei kürzeren Strahlungszeiten die ersten Tropfen zu bilden, eine schon stärkere Kondensation vorhanden sein. So erschienen z. B. bei dem Versuch in der Tabelle I bei 2 Minuten langer Bestrahlung und einer Entspannung um 2 cm erst die ersten Tropfen, während bei einer Strahlungszeit von 3 Minuten und derselben Entspannung bereits ein Tropfenregen sichtbar war. Die erzeugten Kerne hielten sich in dem Nebelgefäß sehr lange. Ihr Vorhandensein nach einer starken Bestrahlung konnte in den verschiedensten Versuchen noch nach vielen Stunden konstatiert werden.

B. Einfluß der Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Wasserstoff.

Im Hinblick auf die in Luft gewonnenen Ergebnisse und auf die von W. Bieber[1]) gemachte Beobachtung, daß ebenfalls in reinem Sauerstoff unterhalb der Ionengrenze eine Kondensation erfolgte, wie sie von E. Barkow[2]) schon in Luft gefunden wurde, lag der Gedanke nahe, daß unter starker Röntgenstrahlung auch

[1]) W. Bieber, Inaug. Diss. Marburg 1911 S. 37.

[2]) E. Barkow, Inaug. Diss. Marburg 1906 S. 23—25, Ann. d. Phys. IV. 23 (1907) S. 324/325.

in reinen einfachen Gasen gleichfalls eine ähnliche Nebelbildung sich zeigen würde, wie sie von mir in Luft beobachtet wurde. Da mir gerade eine Apparatur, die bereits zur Darstellung von reinem Wasserstoff mit Erfolg angewandt wurde,[1]) zur Verfügung stand, benutzte ich sie ebenfalls zur Gewinnung dieses Gases.

1. Darstellung und Reinigung von Wasserstoff.

Der zur Untersuchung benutzte Wasserstoff wurde durch die Elektrolyse von Natronlauge unter Anwendung von Reinnickelelektroden gewonnen. Der Zersetzungsapparat (Tafel II) war einem kleinen Buffschen Apparat nachgebildet. Als Zersetzungsgefäß diente ein zylindrischer Glasbehälter G von 54 cm Höhe und 20,5 cm Durchmesser. Verschlossen wurde er durch einen in Paraffin ausgekochten mit 5 Durchbohrungen versehenen Eichenholzdeckel E. Durch 2 der Bohrungen gingen 1,5 cm weite Glasröhren, die sich gleich unterhalb des Deckels zu den Gasentwicklungszylindern Z von etwa 5 cm Durchmesser und 45 cm Länge erweiterten. Kurz oberhalb des Deckels trugen diese Röhren je ein seitliches mit einem Hahn versehenes Ansatzstück zum Ableiten der entwickelten Gase. Von dieser Ansatzstelle an bis zum oberen Ende der Röhren waren schmale in die Entwicklungszylinder Z herabreichende 1 cm breite Nickelblechstreifen N, an deren unterem Ende die Elektroden D angenietet waren, mit einer Gipsschicht J eingekittet. Die Elektroden bestanden aus fünf 4 cm breiten und 14 cm langen parallel zueinander gestellten Nickelblechen, die an ihrem unteren Ende durch ein quer an das mittlere Elektrodenblech angebrachtes Stück desselben Materials untereinander verbunden waren. Die Zuführung des elektrischen Stromes zu den Elektroden geschah durch den schmalen Nickelblechstreifen. Um ein Ausströmen der Gase durch die poröse Gipsschicht zu vermeiden, war sie oben mit einer dünnen Asphaltschicht A überzogen. Infolge einer notwendig gewordenen Reparatur an einer der Elektroden wurde an dieser eine Änderung vorgenommen. Die auf der Gipsschicht angebrachte Asphaltschicht neigte leicht zum Springen.

[1]) W. Escher, Inaug. Diss. Marburg 1912 S. 48.

Daher wurde eine Anordnung getroffen, die bereits an einem anderen Zersetzungsapparat im Institut sich vortrefflich bewährt hatte. An den Nickelblechstreifen N nietete ich einen Platindraht. Dann wurde ein Stück des Nickelblechstreifens mit dieser Nietstelle gerade so wie vorhin in die Röhre eingegipst, so daß nur noch der Platindraht aus der etwa 1 cm hohen Gipsschicht J hervorragte. Diese wurde mit einer ganz dünnen Schicht geschmolzenen Asphalts übergossen. Um den in den Entwicklungszylindern herrschenden Gasdruck zu kompensieren, der die Asphaltdecke zum Springen bringen könnte, befand sich über derselben eine Quecksilbersäule Q. Dadurch war es möglich, daß die den Strom zuführenden Drähte leicht eingesetzt und herausgenommen werden konnten, ohne daß eine Verletzung der Asphaltschicht zu befürchten war.

Infolge der vom elektrischen Strom bei seinem Durchgang durch die Natronlauge erzeugten Wärme erhitzte sich die Natronlauge in kurzer Zeit äußerst stark. Es war daher als Vorrichtung zu ihrer Kühlung in das Zersetzungsgefäß eine die Entwicklungszylinder umschließende Glasrohrspirale S eingesetzt, deren Enden aus 2 anderen Durchbohrungen im Deckel hervorragten. Durch sie wurde während der Zersetzung in langsamem Strome kaltes Wasser durchgeleitet.

Die fünfte Durchbohrung im Eichenholzdeckel diente zum Einfüllen der zur Zersetzung notwendigen 30 %igen aus feinstem in Alkohol gereinigtem Stangennatron hergestellten Natronlauge. Verschlossen wurde diese Bohrung mit einem paraffinierten Korkstopfen K. Der Deckel wurde mit schwarzem Wachskitt auf den vorher gut mit Alkohol abgewaschenen oberen abgeschliffenen Rand des Zersetzungsgefäßes aufgekittet. Auf dieselbe Weise waren auch die Enden der Glasspirale sowie der Röhren mit den Entwicklungszylindern in die Bohrungen des Deckels eingekittet. Ferner war der ganze Zersetzungsapparat zur nochmaligen Kühlung in ein gleichhohes Blechgefäß B eingesetzt, das von dem aus der Kühlschlange S fließenden Wasser durchströmt wurde.

Da nur der Wasserstoff zu den Versuchen gebraucht wurde, so war, um ein Überdiffundieren des Sauerstoffs in den Wasser-

stoff zu vermeiden, die Anode so hoch angebracht, daß sie gerade von der Lauge bedeckt wurde. Die Kathode hingegen reichte bis fast an den Boden des Zersetzungsgefäßes. Gleichzeitig erhielt man auch hierdurch den zum Durchströmen der Apparatur erforderlichen Überdruck, insofern als der Wasserstoffzylinder beinahe vollentwickelt werden konnte, und auf den in ihm befindlichen Wasserstoff dann ein Druck wirkte von dem Gewicht einer Natronlaugesäule zwischen dem Niveau der Lauge im Wasserstoffzylinder und dem äußeren Zersetzungsgefäß.

Den nicht benutzten Sauerstoff leitete ich direkt in die freie Luft. Der Wasserstoff mußte vor der Untersuchung noch einer Reinigung unterworfen werden. Um etwa die durch heftige Entwicklung in Bläschen mitgerissene Natronlauge aufzufangen, schaltete ich dem Zersetzungsgefäß eine leere Waschflasche vor. Dann passierte der Wasserstoff zur Beseitigung mitgerissener Natronlauge eine mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllte Waschflasche, die gleichzeitig noch zur Kontrolle für die Stärke des durchperlenden Wasserstoffstroms diente. Hierauf folgte eine mit gekörntem Natronkalk gefüllte Röhre, um den Wasserstoff von der mitgeführten Schwefelsäure zu befreien. Etwa mitgeführter Sauerstoff wurde durch eine 80 cm lange, dickwandige, sorgfältig mit Kupferwolle ausgestopfte Kupferröhre entfernt, die durch einen Verbrennungsofen in Rotglut gehalten wurde. Nach dem Durchströmen dieser Röhre konnte der Wasserstoffstrom durch einen Dreiweghahn einmal in ein Gasometer gelenkt werden, oder aber in die Leitung nach dem Nebelgefäß. Vor dem Nebelgefäß befand sich noch ein weiterer Hahn, so daß zu Beginn des Durchleitens während des Erwärmens der Röhre der Wasserstoffstrom auch von hier noch zuerst in das Freie gelenkt werden konnte. Vor dem Eintritt in das Nebelgefäß perlte er zwecks vollkommener Sättigung mit Wasserdampf und zur gleichzeitigen Kontrolle der Stärke des Gasstroms durch eine mit destilliertem Wasser gefüllte Waschflasche.

Sämtliche Verbindungen von Glas an Glas waren durch Schliffe bewerkstelligt, und wo letztere nicht zu gebrauchen waren, wie zwischen Kupferrohr und Glas, wurden die Glas-

röhren mittels Siegellacks in das Kupferrohr eingekittet. Damit diese Verbindungen aber infolge der durch die gute Wärmeleitung des Kupfers bedingten Erhitzung der Rohrenden nicht gelöst wurden, waren an beiden Seiten des 80 cm langen Rohres zwei engere 65 cm lange und 1 cm weite U-förmig gebogene Kupferröhrchen hart angelötet. Zur Kühlung tauchten sie in je ein mit Wasser gefülltes Becherglas. An diese Röhrchen war erst die Glasverbindung angesetzt.

Anfangs schickte ich einen Strom von 5—6 Amp. durch den Zersetzungsapparat, erhielt aber, nachdem die Luft durch zwei Tage langes Durchleiten durch Wasserstoff verdrängt war, immer noch trotz der Vorlagen recht viel Kerne, zum Teil sogar noch freiwillige Kondensation. Diese Kerne können nur etwa noch mitgerissene Tröpfchen Natronlauge sein. Daß feine Teilchen überhaupt mitgerissen wurden, konnte beim Durchleuchten der ersten vorgeschalteten Waschflasche konstatiert werden. Auch nach dem Durchperlen durch die Schwefelsäurevorlage konnten solche noch in recht großer Anzahl beobachtet werden. Daher setzte ich hinter das Kupferrohr noch ein Pettenkofersches Rohr von 115 cm Länge, gefüllt mit konzentrierter Schwefelsäure. Es war ebenfalls wie das früher schon beschriebene mit einer eingeschmolzenen Glasspitze versehen und trug auch an beiden Enden zwei Kugeln. Dann mußte der Wasserstoff wieder eine Röhre mit Natronkalk passieren und demnächst ein dicht gestopftes Glaswollefilter. Ein Filter direkt vor dem Zersetzungsgefäß bewährte sich nach früheren Erfahrungen nicht, da es zu rasch verstopft wurde. Gleichzeitig verminderte ich auch die Stromstärke auf 2—3 Amp. Es gelang mir so schon einen verhältnismäßig kernfreien Wasserstoff darzustellen. Damit nun jede Spur von Kondensationskernen beseitigt wurde, ließ ich den Wasserstoff so lange im Nebelgefäß stehen, bis ich sicher sein konnte, daß die feinen Teilchen sich gesetzt hatten, was durch Versuche kontrolliert wurde. Die Gewinnung der Mengen Wasserstoff, wie ich sie brauchte, war ziemlich schwierig. Vor allem aber fehlte es mir an einem geeigneten Gasometer. Es mußte daher zu jedem Versuch der Wasserstoff immer neu entwickelt werden. Jede Entspannung um 15 cm Quecksilber er-

forderte gegen 400 ccm Wasserstoffgas. Diese Methode war äußerst umständlich und zeitraubend, ließ sich aber unter den obwaltenden Umständen nicht anders durchführen. Es werden daher die Versuche, die mit reinen Gasen im hiesigen Institut fortgesetzt werden, mit einem Nebelgefäß derselben Größe, aber mit einer nach C. T. R. Wilson konstruierten Entspannungsvorrichtung ausgeführt, durch die es ermöglicht wird, dasselbe Gasquantum beliebig oft zu entspannen.

2. Versuche.

Durch einige Vorversuche bestimmte ich ungefähr die Zeit, nach der sämtliche noch im frisch entwickelten Wasserstoff vorhandenen Kondensationskerne verschwunden waren, so daß sicherlich unterhalb der Ionengrenze eine Tropfenbildung nicht zu erwarten war. Nachdem in einem Versuch der Wasserstoff 18 Stunden lang im Nebelgefäß gestanden hatte, war jede Spur von Kondensation bis auf wenige rasch fallende Tröpfchen beim Entspannen unterhalb der Ionengrenze verschwunden. Daraufhin bestrahlte ich 6 Minuten lang ohne Zwischenschalten eines Zinkblechfilters und erhielt beim Entspannen um etwa 12 cm Quecksilber keine Tropfenbildung. Ein weiterer Versuch, bei dem ich den Wasserstoff länger stehen ließ, ergab, daß im normalen Gas bei einer Entspannung von etwas über 14 cm Quecksilber keine Tropfen zu sehen waren. Nach einer Bestrahlung des Wasserstoffs von 6 Minuten langer Dauer und einer darauf erfolgten Entspannung von 12,9 cm Quecksilber war ebenfalls keine Kondensation wahrzunehmen. Demnach bliebe die in Luft beobachtete Nebelbildung für Wasserstoff gänzlich aus.

C. Erörterung der Versuchsergebnisse.

Abweichend von den Versuchen C. T. R. Wilsons[1]) ergab sich bei meinen Untersuchungen bei der Bestrahlung staubfreier Luft durch Röntgenstrahlen eine Kernbildung auch unterhalb der

[1]) C. T. R. Wilson, Philos. Transactions of the Roy. Soc. of London ser. A. vol. 192 (1899) S. 403—453 u. ser. A. vol. 189 (1897) S. 265—307.

Ionengrenze, ein Resultat, das ebenfalls schon E. Barkow[1]) für einen einzelnen Fall (vgl. S. 15) für Luft gefunden hatte. Für reinen Sauerstoff zeigte sich nach der Untersuchung von W. Bieber[2]) dieselbe Erscheinung (vgl. S. 15). Jedoch konnte ich durch meine Versuche weiter feststellen, daß die durch die Röntgenstrahlen gebildeten Produkte in ihrer Eigenschaft als Ansatzkerne für den Wasserdampf abhängig waren von der Dauer der Strahlung und der Art der Strahlen, insofern als je nach dem Zusammenwirken dieser Faktoren eine Nebelbildung bei kleineren oder größeren Übersättigungen erfolgte. Die neuesten Versuche von Herrn O. Conrad, der mit der Fortsetzung meiner Arbeit im hiesigen Institut beschäftigt ist, zeigen, daß in Luft unter bestimmten Versuchsbedingungen bei Behandlung mit Röntgenstrahlen sogar freiwillige Kondensation eintritt.[3]) Nach den Versuchen C. T. R. Wilsons entsteht unter dem Einfluß der Röntgenstrahlen in Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Kohlensäure immer nur eine Nebelbildung an Ionen bei vierfacher Übersättigung. Die Strahlungsdauer hat nach seinen Versuchen keinen Einfluß auf die Veränderung obiger Grenze. Wenigstens zieht er diesen Schluß aus einem Versuch, bei dem er reinen Sauerstoff das eine Mal 1 Minute lang — die Höchstbestrahlungszeit, die ich bei ihm fand — das andere Mal nur 11 Sekunden lang bestrahlt und beim Entspannen in beiden Fällen den Eintritt der regenartigen Kondensation erst bei derselben Entspannungsgröße $\frac{V_2}{V_1} = 1{,}25$ beobachtet. Die Bestrahlungszeiten in seinen anderen Versuchen zählen nur nach Sekunden. Daß bei meinen Versuchen die Ionen als Kondensationskerne in Betracht kommen, ist schwerlich anzunehmen, da dieselben, wie verschiedentlich gezeigt wurde, schon nach einigen Sekunden unwirksam werden, während doch bei meinen Versuchen Kerne noch nach einigen Stunden nachgewiesen werden konnten. Nach C. T. R. Wilson

---

[1]) E. Barkow, Inaug.-Diss. Marburg 1906 S. 23—25, Ann. d. Phys. IV. 23 (1907) S. 324/25.

[2]) W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911 S. 37.

[3]) Für die gütige Überlassung dieses Resultats spreche ich Herrn Conrad meinen besten Dank aus.

beträgt die Lebensdauer der Ionen nur ein paar Sekunden, und nach Untersuchungen von C. Barus[1]) haben sie noch nach 20 und mehr Sekunden Einfluß auf den Dampfstrahl. Auch Rutherford[2]) erhält nach seinen Leitfähigkeitsversuchen für die Dauer des Ionisationszustandes ähnliche Werte.

Nach alledem wird man zu der Annahme berechtigt sein, daß die in meinen Versuchen auftretenden Kondensationskerne Produkte chemischer Vorgänge sind, die sich entweder unter dem direkten Einfluß der Röntgenstrahlen oder aber unter dem der durch diese sekundär erzeugten Kathodenstrahlen vollziehen. Eine einfache Molisierung der Wasserdampfmoleküle bis zu sichtbarer Größe kann nicht angenommen werden, da Tröpfchen reinen Wassers infolge der größeren Dampfspannung über der gekrümmten Oberfläche bei vorhandener 100%iger relativer Feuchtigkeit sofort wieder schon nach ihrem Entstehen in kleinsten Anfängen verdampfen müßten.[3]) Wasserdampfmolekülkomplexe werden sich auch ohne Einfluß der Röntgenstrahlen sicherlich bilden und wieder vergehen. Sie geben die Ansatzkerne für die Tropfen, die bei achtfacher Übersättigung in reinem Wasserdampf entstehen, wie C. T. R. Wilson[4]) gezeigt hat. In unserem Falle kann also eine Molisierung der Wasserdampfmoleküle nicht in Betracht kommen.

Anders liegen die Verhältnisse bei den durch chemische Umsetzung entstandenen Kernen, wenn sie hygroskopisch sind. Bei ihnen ist ein dauerndes Bestehen bei Sättigung (unter Umständen sogar unter 100%) möglich.[5]) Diese Tropfen von kleinstem Radius wachsen nun, wie z. B. Versuche mit ultra-

---

[1]) C. Barus, Smithsonian Contributions 1309 (1901).

[2]) J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen. Deutsch von E. Marx, Leipzig 1906 S. 19.

[3]) Sir W. Thomson, Philos. magazine ser. IV vol. 42 S. 448; H. v. Helmholtz, Vorl. Bd. VI S. 333—337.

[4]) C. T. R. Wilson, Philos. Transactions of the Roy. Soc. of London ser. A. vol. 189 (1897) S. 304—307.

[5]) J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen. Deutsch von E. Marx, Leipzig 1906 S. 139; C. T. R. Wilson, Philos. Transact. of the Roy. Soc. of London ser. A. vol. 192 (1899) S. 403—453; W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911 S. 31/32, Ann. d. Phys. IV. 39 (1912) S. 1327.

violettem Licht zeigen, mit der Länge der Bestrahlungszeit.[1]) Sowohl der lange Bestand der durch Röntgenstrahlen erzeugten Kerne, als auch das Wachsen derselben unter dem Einfluß der Bestrahlung konnte nachgewiesen werden. Das letztere ist daran zu erkennen, daß der Kondensationseintritt kontinuierlich mit wachsender Strahlungszeit bei immer kleineren Übersättigungen erzwungen werden kann und schließlich sogar freiwillig erfolgt. Die kontinuierliche Folge des Eintritts der Kondensation macht es wahrscheinlich, daß immer dasselbe chemische Produkt bei fortdauernder Bestrahlung gebildet wird. Das Wachsen der Tröpfchen mit hygroskopischem Kern geschieht vielleicht unter dem Einfluß elektrischer Ladungen, die (wenn auch nur vorübergehend existierend) event. erst das Zusammentreten der einzelnen Tropfen zu größeren Komplexen oder das Verschmelzen der ersteren mit den letzteren ermöglichen. Jedoch ist diese Annahme elektrischer Ladungen zum Wachsen der Tropfen nicht einmal notwendig, wie die folgenden Überlegungen zeigen. In irgendeinem Zeitpunkt der Bestrahlung mit Röntgenstrahlen der mit Wasserdampf gesättigten Luft möge sich eine hygroskopische Substanz gebildet haben. Infolge ihrer hygroskopischen Eigenschaft (s. Einleitung S. 7) und der nun für sie mit Wasserdampf übersättigten Umgebung wird sie sich mit Wasserdampfmolekülen beladen und so einen Tropfen bilden. Dieser Tropfen müßte bei 100 % relativer Feuchtigkeit, wenn durch die Auflösung der hygroskopischen Substanz eine Änderung in ihrer Konzentration nicht eintreten würde, bis zu einem solchen mit unendlich großem Radius anwachsen. Tatsächlich erfolgt aber mit der Vergrößerung des Tropfens eine Änderung der Konzentration der in dem Tropfen gelösten Substanz und zwar nach der Richtung hin, daß mit zunehmender Größe des Tropfens eine Abnahme der Konzentration stattfindet. Demnach muß dem Wachsen des Tropfens eine Grenze gesetzt sein, und es muß bei 100 % relativer Feuchtigkeit für eine bestimmte Konzentration ein Gleich-

[1]) C. T. R. Wilson, loc. cit.; J. J. Thomson, loc. cit. S. 223; E. Barkow, Inaug.-Diss. Marburg 1906 S. 26, Ann. d. Phys. IV. 23 (1907) S. 326; W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911 S. 28/29, Ann. d. Phys. IV. 39 (1912) S. 1323/24.

gewichtszustand eintreten, der dadurch charakterisiert ist, daß die Dampfspannung des Tropfens bestimmter Größe und dieser Konzentration im Gleichgewicht ist mit der Dampfspannung im Nebelgefäß. Für ein größeres Tröpfchen mit seiner geringeren Konzentration ist danach die 100 %ige relative Feuchtigkeit zu seinem Bestehen zu klein (denn bei reinem Wasser müßte zum Gleichgewichtszustand $r = \infty$ sein), und es muß daher ein Verdampfen eintreten bis zum Gleichgewichtszustand zurück. Andererseits ist bei einem kleineren Radius des Tropfens seine Konzentration noch groß genug, um ein weiteres Wachsen zu ermöglichen. Wir sehen also, wenn keine Änderung in der Sättigung eintritt, daß eine Vergrößerung eines solchen Tropfens nur noch möglich ist durch Vereinigung desselben mit einem oder mehreren anderen Tropfen, die ihrerseits aber durchaus noch nicht den Gleichgewichtszustand erreicht zu haben brauchen. In dem Falle, in dem zwei Tröpfchen derselben Größe und Konzentration zusammentreten, findet eine Änderung in der Konzentration nicht statt. Da nun ein Tröpfchen mit dieser Konzentration bereits bei größerer Krümmung seiner Oberfläche existieren konnte, so ist die Existenz bei dem jetzt größeren Tropfen mit kleinerer Krümmung erst recht möglich. Ja es wird sogar ein Wachsen eintreten durch Anlagerung weiterer Wasserdampfmoleküle, bis von neuem wieder Gleichgewicht vorhanden ist. Je mehr nun hygroskopische Substanzen durch die fortdauernde Strahlung erzeugt werden, desto mehr werden Tröpfchen mit kleinstem Radius sich bilden können, desto eher wird eine Vereinigung durch Zusammenstoß begünstigt, und desto häufiger wird die Bildung größerer Komplexe erfolgen. Es muß also hiernach mit der Länge der Strahlungszeit ein Wachsen der Tropfen und damit der Eintritt der erzwungenen Kondensation bei immer kleinerer Übersättigung erfolgen sogar bei genügend langer Strahlung freiwillig geschehen, was auch tatsächlich die Versuche zeigen. Diese Tröpfchen von kleinstem Radius werden sich gerade am häufigsten an den Stellen mit größter Strahlendichte bilden, von da nach allen Richtungen hin diffundieren und so auf ihrem Weg mit anderen zusammentreffen können. Da nach Beendigung der Bestrahlung keine Tröpfchen mehr gebildet

werden, und ferner die größeren Komplexe schneller als die kleinen zu Boden sinken, wird auch die Vereinigung zu weiteren größeren Komplexen schwieriger werden. Auch die kleinsten Tröpfchen werden sich durch weitere Diffusion allmählich verlieren.

Wie entstehen nun die Kerne bei der Bestrahlung? Ob zur Erklärung der Bildung der hygroskopischen Substanz die Wirkung der sekundären Kathodenstrahlen herangezogen werden muß, scheint direkt nicht notwendig zu sein. Man kann auch den Röntgenstrahlen selbst diese Wirkung zuschreiben und sie ähnlich der des ultravioletten Lichtes annehmen, zumal durch die mit den Röntgenstrahlen angestellten Interferenzversuche[1]) auf die Wellennatur der Röntgenstrahlen geschlossen worden ist. Dadurch ist sogar zu vermuten, daß die durch beide Strahlenarten (ultraviolettes Licht und Röntgenstrahlen) erzeugten Kerne von derselben chemischen Zusammensetzung sind und aus Wasserstoffsuperoxyd bestehen, dessen Bildung unter dem Einfluß des ultravioletten Lichtes von W. Bieber[2]) nachgewiesen wurde und sich höchstwahrscheinlich nach der Gleichung $H_2O + O = H_2O_2$ vollzieht, wofür die in reinem Wasserstoff und reinem Wasserdampf angestellten Versuche, wie C. T. R. Wilson,[3]) Vincent[4]) und W. Bieber[5]) gezeigt haben, sprechen, da in diesen eine Kondensation unterhalb der Ionengrenze nicht eintrat. Für die oben geäußerte Vermutung spricht auch der Umstand, daß die durch Röntgenstrahlen erzeugten Kerne bei meinen Versuchen eine sehr lange Beständigkeit besitzen, die gerade den Wasserstoffsuperoxydkernen eigen ist.[6]) Ferner dürfte auch der von mir mit Wasserstoff angestellte Versuch (S. 23) diese Ver-

---

[1]) W. Friedrich, P. Knipping und M. Laue, Münch. Sitz.-Ber. math.-phys. Kl. 1912 S. 311—322, 363—373.

[2]) W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911, Ann. d. Phys. IV. 39 (1912) S. 1313—1337.

[3]) C. T. R. Wilson, Philos. Transact. of the Roy. Soc. of London ser. A. vol. 192 (1899) S. 403—453.

[4]) Vincent, Proc. of the Cambridge Phil. Soc. vol. 12 Part. IV 1904.

[5]) W. Bieber, Inaug.-Diss. Marburg 1911 S. 37.

[6]) W. Bieber, loc. cit. S. 32; Ann. d. Phys. IV. 39 (1912) S. 1327.

mutung stützen, allerdings unter der Voraussetzung, daß auch in reinem Sauerstoff dieselbe Kondensationserscheinung sich zeigt wie in Luft, was auf Grund der Untersuchung von W. Bieber[1]) wohl anzunehmen ist. Der Widerspruch meiner Resultate mit denen C. T. R. Wilsons erklärt sich wahrscheinlich durch die Verschiedenheit in den angewandten Bestrahlungszeiten. Ferner wäre noch zu bedenken, daß Wilson infolge der damaligen Konstruktion der Röhren (nicht regenerierbar) vielleicht weit härtere und nicht so intensive Strahlen erhielt. Der verschiedene Einfluß harter und weicher Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf wird sicherlich in der Verschiedenheit ihrer chemischen Wirksamkeit begründet liegen. Diese letztere läßt sich erklären durch die verschieden starke Absorption, die beide Strahlenarten erleiden, indem, da die weichen Strahlen stärker absorbiert werden als die harten, bei jenen von der Strahlungsenergie mehr in chemische Energie umgesetzt wird, als dies bei den harten Strahlen der Fall ist. Die weichen Strahlen werden in ihrer chemischen Wirkung den ultravioletten Strahlen am nächsten kommen. Die Fortsetzung dieser Versuche ist im hiesigen Institut bereits aufgenommen worden, um die gefundenen Resultate zu ergänzen und die aufgestellten Erklärungsmöglichkeiten zu prüfen.

D. Ein Versuch, die Dampfstrahlmethode quantitativ auszugestalten.

Die Veranlassung zur Bestimmung der Grenze der normalen Kondensation sowie der Grenze für die Kondensation an Ionen im Dampfstrahl in Gegenwart staubfreier Gase habe ich des näheren bereits in der Einleitung auseinandergesetzt. Die zuerst von R. v. Helmholtz und F. Richarz[2]) angewandte Dampfstrahlmethode hat gegenüber der Entspannungsmethode den Vor-

[1]) W. Bieber, Inaug. Diss. Marburg 1911 S. 37.

[2]) R. v. Helmholtz, Wied. Ann. 32 (1887) S. 1—19; R. v. Helmholtz und F. Richarz, Wied. Ann. 40 (1890) S. 161—202; F. Richarz, Wied. Ann. 59 (1896) S. 592—594.

zug bequemerer Anwendbarkeit, dagegen den Nachteil, daß ihre Empfindlichkeit stark abhängig ist von Nebeneinflüssen, wie z. B. von der Beschaffenheit der den Dampfstrahl umgebenden Luft, von der Größe und Form der Ausströmungsöffnung des Dampfes, von dessen Ausströmungsgeschwindigkeit[1]) u. a. m. Trotz dieser der Methode anhaftenden Mängel hat sie, wie bereits aus den vorhergegangenen Ausführungen bekannt ist, wertvolle Resultate geliefert in der Untersuchung über die Kondensation von Wasserdampf und anderen Dämpfen. Vor allem konnte aber mit ihr zuerst der Nachweis erbracht werden, daß neben dem „Staub" auch andere Ursachen (Ionen, chemische Prozesse usw.) kondensationsauslösend wirken können.

1. Anordnung der einzelnen Apparaturen.

Bei der ursprünglichen Anordnung der Dampfstrahlapparatur trat der in einer Kochflasche erzeugte Wasserdampf zunächst in eine Vorlage, die zum Sammeln des inzwischen in der Rohrleitung sich kondensierten Wasserdampfes sowie zum Ausgleich der für ein gleichmäßiges Ausströmen des Dampfes hinderlichen unregelmäßigen Dampfentwicklung in der Kochflasche diente. Von da strömte er dann aus einer zu einer Spitze von 1—2 mm lichten Weite ausgezogenen Röhre in Zimmerluft von gewöhnlicher Temperatur und Feuchtigkeit aus. Mit dieser Anordnung war es an und für sich schon gegeben, daß mit der Zeit der Dampfstrahl durch die auf ihn selbst kondensierend wirkenden Verunreinigungen der Luft, hervorgerufen durch Flammen, brennende Lampen, zu untersuchende Agentien usw., eine schon so starke Kondensation zeigt, daß andere Kondensationskerne gar nicht mehr auf ihn zu wirken vermögen. Dem schädlichen Einfluß dieser Verunreinigungen der Luft begegneten R. v. Helmholtz und F. Richarz[2]) dadurch, daß sie den Dampfstrahl auf kurze Zeit zur Beobachtung der Kondensation in ein mit Luft

[1]) K. Schaum, Sitz.-Ber. d. Ges. z. Beförderung d. ges. Naturw., Marburg 1902, 8; J. Aitken, Proc. of the Roy. Soc. of London vol. 51 (1892) S. 408—439.

[2]) R. v. Helmholtz u. F. Richarz, Wied. Ann. 40 (1890) S. 169—171.

gefülltes Gefäß einströmen ließen. Diese Anordnung gestattet auch die Untersuchung anderer Gase. Nach einer anderen zuerst von J. Aitken[1]) angegebenen und von C. Barus[2]) erweiterten Methode durchströmt der Dampfstrahl eine von der Zimmerluft abgeschlossene Röhre.

In meinen Versuchen hielt ich mich zunächst an die von C. Barus angewandte Anordnung. Barus schloß den Dampfstrahl in eine 5—7 cm weite und gegen 60 cm lange Röhre ein. Die eine Seite der Röhre konnte durch eine Glasplatte luftdicht abgeschlossen werden, während das andere rechtwinklig umgebogene Rohrende für den Austritt des Dampfes offen war, aber ebenfalls zur Beobachtung der Kondensation ein Glasfenster an der rechtwinkligen Biegung trug. Der Strahl strömte in der Längsrichtung der Röhre dauernd aus einer seitlich nahe dem luftdicht verschlossenen Ende angebrachten Röhre aus. In derselben Höhe der Ausströmungsöffnung des Dampfstrahls war an der Dampfstrahlröhre ein Ansatz derselben Weite dieser Röhre angesetzt. Durch ihn wurde die zu untersuchende Luft dem Dampfstrahl zugeführt. Durchleuchtet wurde die Röhre in Richtung des ausströmenden Dampfes, während die Beobachtung der Kondensation in entgegengesetzter Richtung erfolgte. Zur leichteren Beurteilung einer Kondensationsänderung benutzte er noch eine zweite gerade so eingerichtete Röhre, die direkt neben der ersten angeordnet war und der dauernd unveränderte Luft zugeführt wurde, so daß die durch diese hervorgebrachte Kondensation stets dasselbe Aussehen behielt. Durch diese Anordnung vermeidet Barus zwar den schädlichen Einfluß der durch die Verunreinigungen beständig in ihrer Kondensationswirkung schwankenden Zimmerluft, führt jedoch beiden Röhren immer noch gewöhnliche atmosphärische Luft zu, so daß stets eine Kondensation vorhanden sein mußte. Der genaue Grad der Übersättigung, bei dem eine Kondensation erfolgt, läßt sich jedoch nur angeben für den Punkt, bei dem die Kondensation gerade ihren Anfang nimmt, also

---

[1]) J. Aitken, Proc. of the Roy. Soc. of London vol. 51 (1892) S. 424—426.

[2]) C. Barus, Smithsonian Contributions 1309 (1901) und 1383 von 1903, beides in vol. 29 (1903).

nicht, wenn eine Nebelbildung bereits vorhanden ist. Es war daher für meine Zwecke notwendig, auch die letzte Spur von Kondensation, die durch die Kerne der atmosphärischen Luft hervorgerufen wurde, zu beseitigen. Daher schloß ich bei meiner Anordnung den Zufluß der Luft ganz ab und ließ den Dampfstrahl allein in eine Röhre derselben Weite und Länge, wie sie Barus verwandte, einströmen. Es zeigte sich jedoch, daß durch die Rohröffnung, durch die der Dampf wieder ins Zimmer austrat, bei wagrechter oder etwas geneigter Lage der Röhre — eine solche wurde für die vorteilhafteste gefunden — kalte, verunreinigte Zimmerluft rückwärts in die Röhre eindringen konnte und unregelmäßige Kondensation im Dampfstrahl hervorbrachte, so daß auch hierdurch eine exakte Beobachtung unmöglich gemacht wurde. Diesen Übelstand beseitigte ich dadurch, daß ich diese letzte Verbindung mit der umgebenden Zimmerluft aufhob und die Röhre, nachdem noch eine Kühlvorrichtung hinter ihr für den Wasserdampf eingeschaltet war, mit dem schon aus den früheren Entspannungsversuchen bekannten Vorvakuum verband. Ein an der Röhre angebrachtes Quecksilbermanometer gestattete die Ablesung des in ihr vorhandenen Druckes. Mit dieser Anordnung war der Dampfstrahl äußeren Einflüssen vollkommen entzogen. Ferner war durch die Vakuumeinrichtung auch noch der Vorteil erreicht, die Größe der Druckdifferenz zwischen dem schwer regulierbaren Druck, unter dem der Dampf vor Eintritt in die Röhre stand, und dem, auf den er entspannt wurde, beliebig rasch und doch mit großer Genauigkeit zu variieren. Auch die Untersuchung anderer Gase wie Luft konnte mit dieser Anordnung leicht angestellt werden. Der Anordnung entsprechend mußte auch die Zuführung der zu untersuchenden Substanzen anders eingerichtet werden, als dies bei Barus der Fall war. Bei seiner Einrichtung der Röhre war es möglich, daß Kondensationskerne in sie gelangten, ohne daß diese Kerne auf den Dampfstrahl Wirkung zu haben brauchten, insofern als sie längs der Röhrenwandung wieder aus der Röhre hinausgleiten konnten und damit gar nicht in Berührung kamen mit dem für die Kondensation empfindlichsten Teil des Dampfstrahls, dem Gebiet in der Nähe der Ausströmungsöffnung des Dampfes.

Nach dem Ausprobieren verschiedener Konstruktionen wurde schließlich die Zuführung so gewählt, daß zwei mit Hähnen versehene Röhren von 5 mm lichter Weite direkt am Anfang des Strahles an seiner empfindlichsten Stelle endigten. Dadurch mußten alle verfügbaren Kondensationskerne zur Wirkung gelangen. Diese Röhren waren ebenso wie die Röhre mit der Ausströmungsöffnung des Dampfes durch Schliffe in das große aus Glas bestehende Rohr eingesetzt. Ferner war das Dampfstrahlrohr noch mit Vorrichtungen versehen zur Untersuchung der elektrischen Spitzenausströmung und des elektrischen Wechselfeldes.

Ließ man bei dieser Anordnung den Dampfstrahl in die zu Anfang mit Zimmerluft gefüllte Röhre eintreten, dann war eine Kondensation sichtbar. Die um die Ausströmungsöffnung herum der rückwärtigen Rohrwand zu sich befindlichen Nebelmassen gerieten in heftige Wirbelbewegung. Nach geraumer Zeit war dann die Röhre ganz klar geworden. Als notwendig für das Eintreten einer Nebelbildung hatte es sich schon bei den Vorversuchen herausgestellt, die Substanzen plötzlich und womöglich in größerer Menge einzuführen, da z. B. langsam eintretende Zimmerluft vielfach ganz ohne Wirkung auf die Kondensation blieb. Durch dieses plötzliche Einströmen war jedoch eine starke Änderung um mehrere Zentimeter Quecksilber in den bisher mit Mühe aufrechtgehaltenen Druckverhältnissen, die zur Messung herangezogen werden sollten, bedingt. Auch in allen Fällen, in denen selbst stark kondensierende Agentien verwandt wurden, war die eingetretene Kondensation bei weitem viel schwächer im Vergleich zu der, die beim Entspannen sich zeigte. Diese schwache Kondensation mag wohl darin ihren Grund haben, daß die Temperatur in der Röhre äußerst hoch bis zu ca. 92° C gelegen war. Schon nach den ersten Versuchen erschien es wenig aussichtsreich mit dieser Anordnung zum Ziel zu gelangen, zumal auch über die beobachteten Kondensationen kein klarer Überblick gewonnen werden konnte. Praktisch bewährte sich diese Anordnung absolut nicht.

Nach diesem ungünstigen Ausgang blieb noch der Weg übrig, den R. v. Helmholtz und F. Richarz schon einge-

schlagen hatten. Ihre einfachste Anordnung des Kondensationsgefäßes zur Untersuchung des Einflußes von chemischen Prozessen auf den Dampfstrahl war folgende: Die obere Öffnung einer Klärflasche von 10 Liter Inhalt konnte durch einen zweimal durchbohrten Kautschukstopfen verschlossen werden. Durch die eine Bohrung führte ein mit einem Trichter versehenes Glasrohr zum Einbringen der zu untersuchenden Substanz. Durch die andere führte der eine mit einem Hahn versehene zu einer Spitze von 1 — 2 mm lichten Weite ausgezogene Teil eines T-Rohres. Die rückwärtige Verlängerung dieses Teils konnte gleichfalls mit einem Hahn verschlossen werden und diente dazu den Dampf in die Zimmerluft zu leiten, sofern er nicht zu den Versuchen in die Flasche eingelassen wurde. In den horizontalen Teil des T-Rohres strömte der Dampf aus dem Kochgefäß Auch in der unteren Öffnung der Flasche war ein Kautschukstopfen eingesetzt, durch den eine mit Hahn verschlossene Glasröhre führte. Zuerst war die Flasche vollkommen mit Wasser gefüllt. Dann wurde in den horizontalen Teil des T-Rohres ein fester Wattepfropfen gepreßt. Durch entsprechendes Drehen der Hähne an dem T-Stück, durch Schließen des Trichterrohres und durch Öffnen des Hahnes am Boden wurde durch das ausfließende Wasser filtrierte Luft in die Flasche hineingesogen. Dies geschah so lange, bis der Wasserspiegel wenig höher als die Ausflußöffnung stand. Die Flasche wurde geschlossen, der Wattepfropfen herausgenommen, und die Verbindung mit dem Kochgefäß hergestellt. Es ist leicht zu sehen, daß durch Anbringen entsprechender Einrichtungen auch die Wirkung des elektrischen Wechselfeldes und der elektrischen Spitzenentladung untersucht werden konnte, sowohl in Luft als auch in anderen Gasen. Diese Anordnung legte ich der meinigen zugrunde. Zugleich ließ sich die von mir benutzte Flasche als Entspannungsgefäß verwenden. Beide Methoden konnten dann ungestört nebeneinander gebraucht werden, was zum Vergleich beider von großem Vorteil war.

Der Dampf wurde in einem auf 6 Atmosphären geeichten Dampfkessel D (Tafel III Fig. 1) von etwa 16 Liter Inhalt erzeugt. Der Kessel besaß ein Ansatzstück zum Einfüllen des Wassers,

ein Rohr R, das mit einem Messinghahn versehen war, zum Ableiten des Dampfes und ein Sicherheitsventil V in Form eines Hebelventils, das eine ziemlich genaue Regulierung des Dampfdruckes gestattete. Zur Vermeidung eines zu großen Dampfverlustes durch Ausströmen aus dem Ventil und einer dadurch bedingten Verkürzung der Versuchsdauer mußte auch der Gasstrom zum Heizen des Kessels reguliert werden. Auf diese Weise war es möglich, den Druck im Kessel fast immer konstant zu halten und den Dampfstrahl mehrere Stunden lang ununterbrochen in Gang zu lassen. Zur jeweiligen Feststellung des Wassergehalts im Kessel war er mit einem Wasserstandsglas versehen.

Von dem Dampfkessel strömte der Dampf zuerst in einen zylindrischen Kupferbehälter G von 8 cm Durchmesser und 14 cm Höhe. Vermittels einer Flansche war er an das Dampfrohr des Kessels angesetzt. Er diente zum Sammeln des in der Zuleitungsröhre niedergeschlagenen Kondensationswassers. Ferner war auf ihn ein Metallmanometer M aufgeschraubt, an dem der jeweilige Druck abgelesen werden konnte. Zur Messung der Temperatur des Dampfes stand das Thermometer T in einem nach dem Innern des Behälters eingelöteten mit Öl gefüllten kleinen Kupferzylinder. Temperaturschwankungen während eines Versuchs waren ausgeschlossen, da ein solcher erst angestellt wurde, wenn das Thermometer eine Zeitlang konstant geblieben war. Durch einen Hahn am Boden des Gefäßes konnte nach Beendigung der Versuche das Kondensationswasser abgelassen werden. Zum Schutz gegen unnötigen Wärmeverlust war der ganze Behälter mit einem Mantel aus Pappe umhüllt, und der Zwischenraum mit Kieselgur ausgefüllt.

Von diesem Gefäß trat der Dampf auf kürzestem Wege in das Beobachtungsgefäß B ein. Die Verbindung mit dem letzteren war folgendermaßen hergestellt. Auf den Kupferbehälter war ein Kupferröhrchen von 1 cm Weite aufgelötet und auf dieses wieder ein in seiner Achse durchbohrter Messingzylinder von größerem Durchmesser als das Röhrchen. Die Weite der Durchbohrung im Zylinder war 8 mm. Auf dem Außenmantel des Messingzylinders war ein Gewinde eingeschnitten. Auf die noch

freie ebene Fläche des Zylinders paßte eine ebenfalls durch bohrte Messingscheibe mit angelötetem Kupferrohr. Das Ganze wurde durch eine Überfangschraube S zusammengehalten (Tafel III, Fig. 2). Als Dichtung diente eine kleine Scheibe aus Asbestpappe. Die Verbindung des Kupferrohres mit dem nun folgenden Glasrohr mit angesetztem Dreiweghahn geschah durch einen kurzen Gummischlauch. Ein Rohrstück des Dreiweghahns mündete im Beobachtungsgefäß B. Die Verschraubung gestattete ein leichtes Abnehmen des Beobachtungsgefäßes von der festliegenden Dampfleitung.

Als Beobachtungsgefäß diente eine Flasche von 42 cm Höhe und 18 cm Durchmesser mit einer oberen weiten Öffnung und einer engeren am Boden. Die obere Öffnung wurde verschlossen mit einem doppelt durchbohrten Korkstopfen, der sorgfältig eingekittet und, um eine absolute Dichtung zu erzielen, auch noch mit Kitt überstrichen war. In die eine Bohrung ging ein Dreiweghahn, durch den je nach dessen Stellung filtrierte oder gewöhnliche Luft eingeleitet oder andere Gase eingeführt werden konnten. An Stelle des T-Rohres, das R. v. Helmholtz und F. Richarz in ihrer Anordnung benutzten, setzte ich in die zweite Bohrung den an die Dampfleitung angeschlossenen Dreiweghahn. Beide Dreiweghähne waren in den Korkstopfen mit Dextrin eingekittet. Das in das Beobachtungsgefäß hineinragende Rohrstück des Dreiweghahns war zu einer Spitze mit einer Öffnung von 1 mm Durchmesser ausgezogen. Zum leichteren Abtropfen des an der Spitze kondensierten Wassers besaß sie an ihrer unteren Seite einen kleinen Glasdorn (Tafel III, Fig. 3). Das Beobachtungsgefäß lagerte etwas geneigt auf einem verstellbaren Holzgestell.

In die untere Öffnung des Gefäßes paßte ein durchbohrter Gummistopfen. Die in diesen gesteckte Glasröhre ging zu einem Quecksilbermanometer und dann weiter zu dem Vorvakuum. Durch einen weit gebohrten Hahn H konnte dieses vom Beobachtungsgefäß abgeschlossen werden. Etwas Wasser im letzteren sorgte für die Sättigung der Luft mit Wasserdampf. Durch entsprechendes Stellen der Hähne am Versuchsgefäß konnten in diesem mittels des Vorvakuums durch Öffnen des Hahnes H

Entspannungen hervorgebracht werden, selbst wenn der Dampfstrahl in Tätigkeit war, da dieser, wenn er zu keinem Versuch gebraucht wurde, doch immer durch den wagrechten Teil des Dreiweghahns in die Zimmerluft ausströmte. Man war also mit dieser Anordnung imstande, zunächst eine Kondensation an bestimmten Kernen mit der Entspannungsmethode zu beobachten und unter den gleichen Bedingungen dann kurze Zeit danach den Einfluß dieser Kerne auf den Dampfstrahl. Somit war es möglich, die mit den beiden Methoden gewonnenen Resultate bequem miteinander vergleichen zu können. Nach jedem Anheizen des Kessels mußte das Durchleiten des Dampfes mit großer Vorsicht geschehen, damit der Dreiweghahn langsam sich gleichmäßig erwärmen konnte, und dadurch ein Springen verhindert wurde. Sodann strömte der Dampf so lange in die Zimmerluft, bis sämtliche Dampfleitungen frei von Luft sein konnten. Nachdem dann noch der Dampfdruck, der in meinen Versuchen meistens nur wenige Zentimeter Quecksilber höher als der Atmosphärendruck lag, die gewünschte konstante Größe hatte, konnten die Versuche beginnen. Die Änderung der Größe des Druckes, um den der Dampfstrahl sich entspannen sollte, geschah durch Druckänderungen im Beobachtungsgefäß vermittels des Vorvakuums. Durch dieses war es nämlich viel leichter und schneller möglich, die für die Entspannung notwendige Druckdifferenz zu erhalten, als wenn dieselbe durch Vermehrung oder Verminderung des Druckes im Dampfkessel hergestellt worden wäre. Da der Dampfstrahl zur Beobachtung immer nur wenige Sekunden in die Flasche strömte, war eine Erwärmung der in ihr befindlichen Luft wohl äußerst gering. Ebenfalls stieg der Druck in der Flasche, wie einige meiner Versuche ergaben, beim Einlassen des Dampfes für diese kurze Zeit nur um wenige etwa 2—4 mm. Das Beobachtungsgefäß wurde längs seiner Achse mit dem Lichtkegel einer Bogenlampe gegen die Ausströmungsrichtung des Strahles durchleuchtet. Die Kondensation beobachtete ich in Richtung des Strahles. Die dem Beobachtungsgefäß zugeführte Luft war auf die schon früher beschriebene Art gereinigt (vgl. S. 14). Auf dieselbe Weise wie früher wurde auch jetzt das Beobachtungsgefäß von Kondensationskernen befreit.

2. Versuchsergebnisse.

Ließ ich nach den soeben beschriebenen Vorkehrungen den Dampfstrahl in das kernfreie Beobachtungsgefäß eintreten, dann konnte ich ebenfalls, wie R. v. Helmholtz und F. Richarz[1]) schon in staubfreier Luft und reinen Gasen festgestellt haben, keine Nebelbildung wahrnehmen, sofern allerdings, wie sich weiter durch die Beobachtungen herausstellte, die Druckdifferenz zwischen dem Druck des Dampfes vor der Ausströmung und dem, auf den er sich entspannte, unterhalb einer gewissen Grenze lag. Genau wie bei der Entspannungsmethode trat dann auch im Dampfstrahl beim Überschreiten dieser Grenze eine Nebelbildung in der kernfreien Luft auf. Aus verschiedenen Versuchen, die ich mit zwei verschiedenen an dem Ausströmungsrohr des Dampfes angesetzten Spitzen (Tafel III, Fig. 3 u. 4) angestellt habe, geht hervor, daß bei einer Druckdifferenz von ungefähr 25 cm Quecksilber obige Grenze liegt. Für die eine Spitze (Fig. 3) trat etwas früher Kondensation ein. In beiden Fällen war jedoch die Beobachtung durch die trotz der Abtropfvorrichtung von der Spitze abgeschleuderten Tröpfchen erheblich erschwert, so daß eine exakte Bestimmung der Grenze wie bei der Entspannungsmethode nicht möglich war. Immer war jedoch der Dampfstrahl bei Entspannungen über 25 cm Quecksilber sichtbar, und er zeigte bei Druckdifferenzen von ungefähr 30 cm sehr schön rotgelb gefärbte Ränder. Außer der störenden Wirkung der abgeschleuderten Tropfen stellte sich noch weiter der Nachteil ein, daß trotz sorgfältiger Behandlung des Dreiweghahns dieser nach einigen mit ihm angestellten Versuchen sprang. Dadurch war immer ein Neuaufbau der Apparatur nötig. Für weitere Versuche wird es daher von Vorteil sein, den Dreiweghahn durch eine geeignete Vorrichtung aus Metall zu ersetzen und die Spitze so zu konstruieren, daß ein Abschleudern von Tröpfchen vermieden wird. Aller Wahrscheinlich-

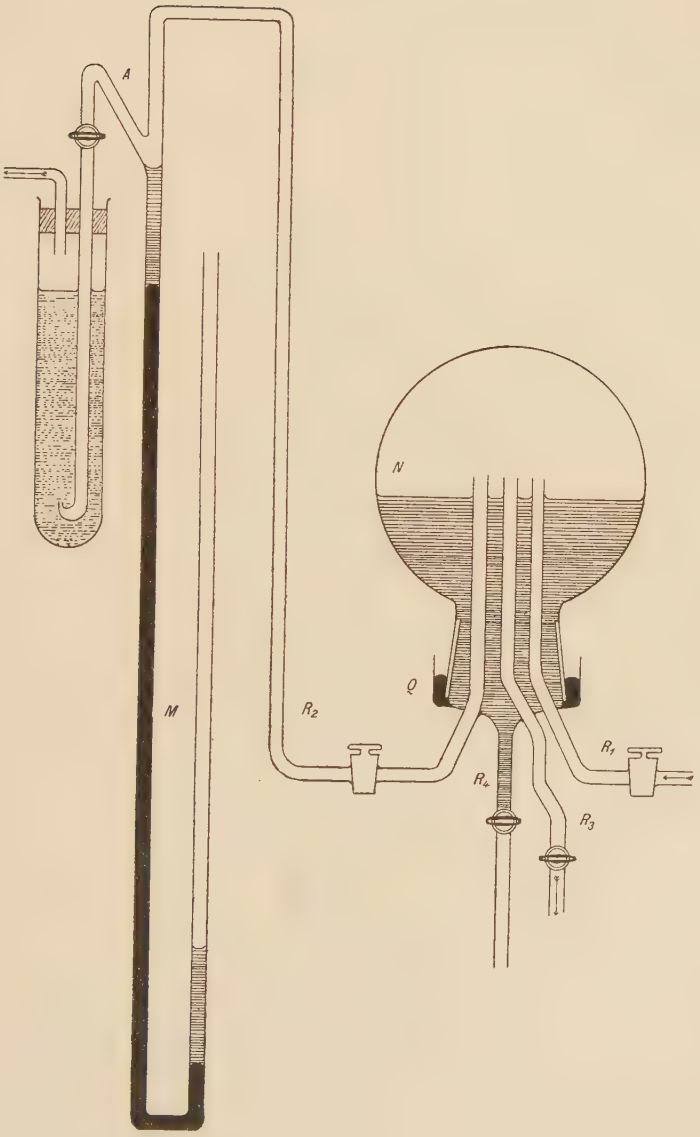
---

[1]) R. v. Helmholtz u. F. Richarz, Wied. Ann. 40 (1890) S. 170.

keit nach entspricht die beim Dampfstrahl gefundene Grenze um 25 cm Quecksilber Entspannung der Grenze der normalen Kondensation in der Entspannungsmethode. Die Versuche mit Röntgenstrahlen zur Bestimmung der Ionengrenze im Dampfstrahl führten zu den in den Teilen A, B und C auf S. 10—29 dieser Arbeit beschriebenen Versuchen mit der Entspannungsmethode.

Robert Noske, Borna-Leipzig, Großbetrieb für Dissertationsdruck.

Tafel I.



Tafel II.

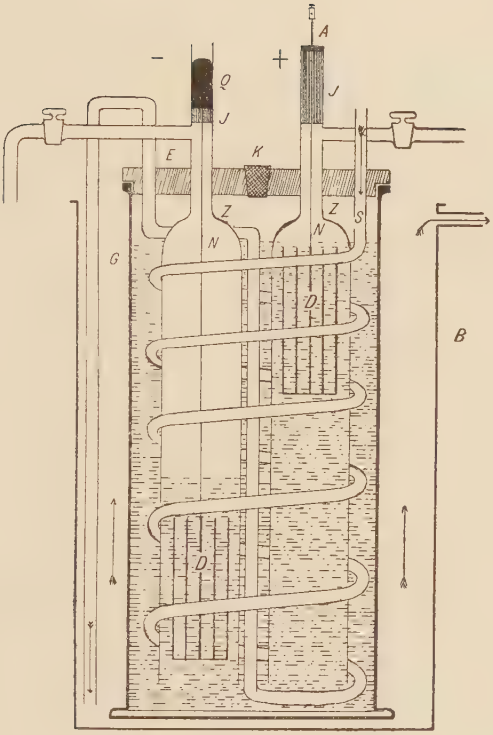


Fig. 2.

Fig. 3.

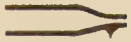


Fig. 4.

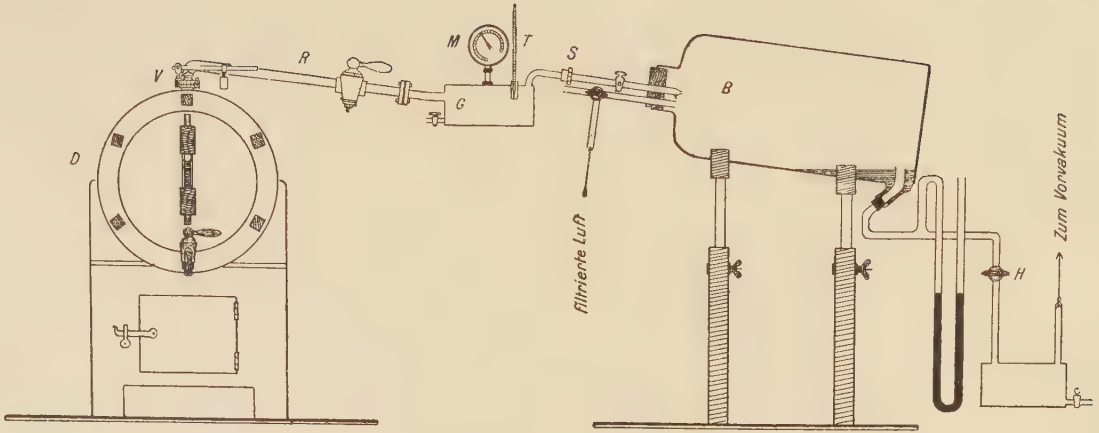


Fig. 1.

Tafel III.

Die vorliegende Arbeit wurde im physikalischen Institut der Universität Marburg angefertigt.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer

Herrn Prof. Dr. F. Richarz

für die Anregung zu dieser Arbeit und für das mir stets entgegengebrachte fördernde Interesse meinen ergebensten Dank auszusprechen.

Ebenso danke ich herzlichst

Herrn Dr. Karl Stuchtey

für die vielen Ratschläge bei den Versuchen und bei Abfassung der vorliegenden Arbeit.

Lebenslauf.

Ich, Carl Friedrich Leibfried, wurde am 15. Februar des Jahres 1890 in Sindelfingen (Württemberg) geboren. Ich bin evangelischen Bekenntnisses und württembergischer Staatsangehöriger. Meinen ersten Unterricht erhielt ich in der Volks- und Realschule zu Sindelfingen, besuchte dann auf ein weiteres Jahr die Volksschule in Jagstfeld und trat Ostern 1900 in die Quinta der Realschule zu Wimpfen a. N. (Hessen) ein. Von Ostern 1906 besuchte ich die Oberrealschule zu Darmstadt und verließ Ostern 1908 diese Anstalt mit dem Zeugnis der Reife, um mich dem Studium der Physik, Chemie, Mineralogie und Mathematik zu widmen. Im Sommersemester desselben Jahres und in den folgenden Semestern bis zum Herbst des Jahres 1909 war ich in München immatrikuliert. Das Wintersemester 1909/10 verbrachte ich an der Universität Göttingen, und Ostern 1910 bezog ich die Universität Marburg. Das Examen rigorosum bestand ich am 11. Februar 1914. In der folgenden Zeit bereitete ich mich in Marburg zum Staatsexamen vor.

Meine akademischen Lehrer, denen ich zu großem Dank verpflichtet bin, waren

in München: Brentano, Brunn, Burger, Doehlemann, Hegi, Lindemann, Lipps, Muncker, v. Notthafft, Paul, Perron, Pringsheim, Riehl, Röntgen, Voß;

in Göttingen: Klein, Prandtl, Toeplitz, Wallach, Zermelo;

in Marburg: Bauer, Feußner, Hensel, Kayser, Natorp, Neumann, Richarz, Schulze, Schwantke, Schwarz, Take, Thiel, Zincke.